

SKRIPSI

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PENERAPAN
DISTRIBUTED GENERATION PADA SISTEM
KELISTRIKAN WILAYAH BENGKULU**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan
Pendidikan Tingkat Sarjana (S1)**



**Oleh :
PUJO SANTOSO
G1D008050**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS BENGKULU
2014**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN PENERAPAN *DISTRIBUTED GENERATION* PADA SISTEM KELISTRIKAN WILAYAH BENGKULU

Sejauh yang saya ketahui bukan merupakan hasil duplikasi dari skripsi dan/atau karya ilmiah lainnya yang pernah dipublikasikan dan/atau pernah dipergunakan untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di Perguruan Tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Bengkulu, Juli 2014

Pujo Santoso

G1D008050

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO :

- *Doa dan Restu Orang Tua adalah Kunci Sukses.*
- *Kuatkan Hati, Jaga Iman, jangan lupa Berdoa, dan terus Berusaha.*
- *Semua akan indah pada Waktunya*
- *Selalu Mementingkan DUIT (Doa, Usaha, Ikhlas, Tawakal)*

PERSEMBAHAN :

Skripsi ini kuselesaikan untuk kupersembahkan kepada :

- *Allah SWT tuhan semesta alam, pelindung segala umat, pemberi petunjuk dalam segala kesusahan.*
- *Kedua orang tuaku, Ponco Winoto (Alm) dan Ibu Winarsih yang telah mencurahkan kasih sayang, materi dan doa yang tak henti untuk keberhasilanku,*
- *Kedua adikku puput dan Risna serta keluarga yang selalu memberi motivasi dan doa dalam setiap langkahku.*
- *Yuliam Hartini, S.Si yang selalu memberikan dorongan dan motivasi untuk melangkah maju kearah yang lebih baik.*

Abstrak

Analisis kestabilan transien penerapan *distributed generation* (DG) pada sistem kelistrikan wilayah Bengkulu dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh kestabilan transien generator utama terhadap penambahan DG. Analisis pada sistem tenaga menggunakan simulasi dengan penambahan DG pada bus saluran sukamerindu dan pekalongan. DG yang digunakan yaitu *photovoltaic* dengan kapasitas 1.2 MW dan *microhydro* dengan kapasitas 2 x 700 kW. Setelah dilakukan penambahan DG diberikan gangguan transien pada bus saluran sukamerindu dengan waktu pemutusan gangguan 100 milidetik, 250 milidetik dan 500 milidetik, dan dianalisis bagaimana pengaruh sebelum dan sesudah penambahan DG. Sistem dengan tambahan DG memiliki respon kestabilan sudut rotor lebih baik dibandingkan tanpa tambahan DG dengan *critical clearing time* generator PLTA Musi 250 milidetik, generator 1- 4 PLTA Tess 230 milidetik dan generator 5-6 PLTA Tess 150 milidetik.

Kata kunci : *distributed generation*, kestabilan transien, *critical clearing time*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	viii

BAB 1 . PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. <i>Distributed Generation</i>	6
2.2. Kestabilan Transien sistem Tenaga.....	7
2.2.1. Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	9
2.2.2. Persamaan sudut Daya.....	10
2.2.3. Kriteria sama Luas Kestabilan.....	10
2.3. Pembangkitan Energi Listrik	13

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu Pengujian	18
3.2 Objek Penelitian	18

3.3 Metode Penelitian	18
3.4 Diagram Alir	24

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Sebelum dan setelah pemasangan DG	26
4.1.1 Kestabilan Sistem Tenaga Sebelum Pemasangan DG	26
4.1.2 Kestabilan Sistem Tenaga setelah Penambahan DG.....	29
4.2 Analisa Kestabilan Sistem Tenaga Setelah Diberi Gangguan Transien	
4.2.1 Sistem Tanpa Tambahan DG	35
4.2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Dengan Tambahan DG <i>Photovoltaic</i> ..	44
4.2.3 Sistem Tenaga Dengan Tambahan DG <i>photovoltaic</i> dan <i>Microhydro</i>	52
4.3 Waktu Pemutusan Gangguan Kritis (<i>Critical Clearing Time</i>)	
4.3.1 <i>Critical Clearing Time</i> Pembangkit Tanpa Tambahan DG	63
4.3.2 <i>Critical Clearing Time</i> Pembangkit Dengan Tambahan DG <i>Photovoltaic</i>	64
4.3.3 <i>Critical Clearing Time</i> Pembangkit Dengan Tambahan DG <i>photovoltaic</i> dan <i>microhydro</i>	65

BAB 5 PENUTUP.....	66
---------------------------	-----------

DAFTAR PUSTAKA	67
-----------------------------	-----------

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 koneksi Distributed Generation.....	6
Gambar 2.2 Respon sudut rotor terhadap gangguan transien	9
Gambar 2.3 Diagram fasor mesin serempak untuk studi kestabilan peralihan ...	10
Gambar 2.4 Lengkung sudut daya	11
Gambar 2.5 Lengkung sudut daya yang menunjukkan sudut pemutusan kritis..	13
Gambar 2.6 Simbol photovoltaic	14
Gambar 2.8 karakteristik photovoltaic	15
Gambar 2.8 karakteristik efisiensi terhadap temperatur	15
Gambar 2.9 Skema PLTMH	17
Gambar 3.1 Jaringan sistem tenaga listrik	18
Gambar 3.2 Jaringan sistem tenaga listrik dengan penambahan DG untuk simulasi	20
Gambar 3.3 Sistem dengan pembangkit terdistribusi microhydro.....	21
Gambar 3.4 Sistem dengan pembangkit terdistribusi photovoltaic	21
Gambar 3.5 Rencana pemberian gangguan 3 fasa bus saluran	22
Gambar 3.6 Diagram alir.....	24
Gambar 4.1 Single line simulasi tanpa menggunakan DG	27
Gambar 4.2 Grafik kestabilan sudut rotor generator tanpa DG	27
Gambar 4.3 Simulasi dengan tambahan DG	28
Gambar 4.4 Grafik hasil simulasi dengan tambahan dua unit DG.....	29

Gambar 4.5 single line dengan tambahan empat unit DG	30
Gambar 4.6 Grafik hasil simulasi dengan tambahan empat unit DG.....	30
Gambar 4.7 Grafik perubahan arus pembangkit tanpa tambahan DG	33
Gambar 4.8 Grafik perubahan daya pembangkit tanpa tambahan DG	35
Gambar 4.9 Grafik perubahan daya reaktif pembangkit tanpa tambahan DG	35
Gambar 4.10 Grafik perubahan arus tanpa DG dengan waktu 250 milidetik.....	38
Gambar 4.11 Grafik perubahan daya tanpa DG dengan waktu 250 milidetik	39
Gambar 4.12 Grafik perubahan daya reaktif	40
Gambar 4.13 Grafik perubahan arus	41
Gambar 4.14 Grafik perubahan daya dengan waktu pemutusan 500milidetik	41
Gambar 4.15 Grafik perubahan daya reaktif	42
Gambar 4.16 Simulasi sistem dengan tambahan DG.....	43
Gambar 4.17 Grafik perubahan arus pembangkit dengan tambahan DG	45
Gambar 4.18 Grafik perubahan daya pembangkit dengan tambahan DG	45
Gambar 4.19 Grafik perubahan daya reaktif.....	46
Gambar 4.20 Grafik perubahan arus dengan pemutusan 250 milidetik.....	47
Gambar 4.21 Grafik perubahan daya dengan pemutusan 250 milidetik.....	49
Gambar 4.22 Grafik perubahan daya reaktif pemutusan 250 milidetik	49
Gambar 4.23 Grafik perubahan arus pemutusan 500 milidetik	50
Gambar 4.24 Grafik perubahan daya pemutusan 500 milidetik	52
Gambar 4.25 Grafik perubahan daya reaktif pemutusan 500 milidetik	52
Gambar 4.26 single line dengan empat DG	55

Gambar 4.27 Grafik perubahan arus	55
Gambar 4.28 Grafik perubahan daya	56
Gambar 4.29 Grafik perubahan daya reaktif.....	57
Gambar 4.30 Grafik perubahan arus dengan empat DG	59
Gambar 4.31 Grafik perubahan daya dengan empat DG	59
Gambar 4.32 Grafik perubahan daya reaktif	60
Gambar 4.33 Grafik perubahan arus	61
Gambar 4.34 Grafik perubahan daya	63
Gambar 4.35 Grafik perubahan daya reaktif.....	64
Gambar 4.36 Grafik waktu pemutusan 200 milidetik.....	67
Gambar 4.37 Grafik waktu pemutusan 150 milidetik.....	67
Gambar 4.38 Grafik pemutusan 230 milidetik	

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi terbarukan terus mengalami perkembangan untuk menekan penggunaan energi fosil yang berdampak cenderung kurang baik terhadap lingkungan. Di antara sumber energi terbarukan yang saat ini banyak dikembangkan seperti turbin angin, tenaga air (*hydro power*), energi gelombang air laut, tenaga surya, tenaga panas bumi, tenaga hidrogen, dan bio-energi, tenaga surya atau solar sel merupakan salah satu sumber yang cukup menjanjikan serta ramah lingkungan.

Umumnya pembangkit-pembangkit yang ada, memiliki kapasitas yang besar dan terletak jauh dari pusat beban, sehingga memerlukan sistem transmisi dan distribusi yang panjang. Hal tersebut tentunya mengakibatkan suplai energi listrik pada ujung beban menjadi tidak sesuai, dengan adanya pembangkit tersebar (*Distributed Generation*) yang penempatannya pada ujung beban memiliki kapasitas kecil 50kW sampai 10 MW dapat membantu mengatasi masalah suplai energi listrik. Sumber energi yang digunakan dapat berupa air, angin dan surya tergantung dari potensi sumber daya di suatu daerah yang akan dipasang DG. Pemasangan DG pada ujung beban tentunya juga harus memperhatikan sistem pembangkit utama seperti masalah kestabilan generator utama tersebut ketika terjadi gangguan.

PT. PLN sektor Pembangkitan Bengkulu memiliki pembangkit dengan tenaga air PLTA Musi 3 x 70 MW dan PLTA Tes 4 x 4.9 MW serta 2 x 630 kW, ketiga pembangkit ini terhubung ke sistem interkoneksi Sumatra bagian selatan. Dengan kata lain pembangkit yang berada di Bengkulu tidak hanya menyuplai energi untuk wilayah Bengkulu saja tetapi juga menyuplai kebutuhan energi untuk wilayah Sumatra bagian selatan, besar penggunaan energi listrik di wilayah Bengkulu saat beban puncak 108,8 MW dan untuk total beban puncak seluruh Sumatera bagian selatan adalah 1419 MW, total ENS 1.928 MWh yaitu akibat gangguan penyaluran 1.798 MWh, MLS dan OLS 92 MWh, defisit daya 38 MWh [1]. Namun terdapat juga kendala dimana saat musim kemarau pembangkit PLTA

Musi dan PLTA Tes tidak dapat beroperasi secara beban penuh dikarenakan debit air yang kurang mencukupi. Untuk itu dengan penambahan DG diharapkan dapat meningkatkan suplai energi listrik di wilayah Bengkulu dan meningkatkan kestabilan sistem tenaga.

Masalah kestabilan tentunya sangat penting untuk diperhatikan, hal ini menyangkut kemampuan dari generator untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan sistem. Keadaan sinkron merupakan keadaan dimana selisih daya mekanik dan daya elektrik dari generator sama dengan nol. Ketika adanya pelepasan beban maupun adanya penambahan beban, selisih antara daya mekanik dan daya elektrik telah berubah. Hal ini menyebabkan adanya percepatan atau perlambatan rotor. Maka sudut rotor akan berubah, jika tidak segera diatasi akan menyebabkan adanya *loss sinkron* pada generator.

Untuk itu Penggunaan DG pada sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu tentunya harus dikaji lebih dalam, meliputi kestabilan sistem tenaga pada sistem yang mendapat penambahan DG, respon sudut rotor generator saat terjadi gangguan dan penanganan sesaat setelah terjadinya gangguan. Pada penelitian ini untuk mengetahui sejauh mana efek dari penggunaan DG terhadap kestabilan generator utama, waktu pemutusan kritis gangguan pada sistem tenaga listrik di wilayah unit penyaluran transmisi PT.PLN sektor pembangkitan Bengkulu dengan melakukan simulasi menggunakan program DIGSilent.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, dapat dirumuskan beberapa permasalahan yang akan dibahas dalam skripsi. Di antaranya:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan DG terhadap kestabilan transien sistem tenaga
2. Bagaimana pengaruh DG terhadap kestabilan transien pembangkit utama ketika diberi gangguan transien
3. Bagaimana kestabilan transien pembangkit utama sebelum dan sesudah diberi DG
4. Bagaimana waktu pemutusan gangguan kritis (*critical clearing time*) saat gangguan terjadi

1.3 Batasan Masalah

1. Hanya membahas bagaimana kestabilan transien generator utama terhadap penggunaan DG.
2. Lokasi penempatan dan jenis DG ditentukan sendiri tanpa menganalisa potensi sumber energy.
3. Penentuan lokasi penambahan DG tanpa menganalisa defisit daya.
4. Hanya menganalisis respon sudut rotor generator.

1.4 Tujuan.

1. Menganalisis kestabilan sudut rotor generator sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu sebelum dan sesudah pemasangan DG.
2. Menganalisis kondisi kestabilan sudut rotor generator sebelum dan setelah penambahan DG pada sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu setelah diberi gangguan transien.
3. Menganalisis waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) melalui simulasi digsilin dan analisa perhitungan pemutusan kritis (*critical clearing time*).

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai dampak pemasangan *distributed generation* terhadap rugi-rugi daya membahas tentang bagaimana penempatan DG pada bus sistem distribusi, sehingga memberikan dampak penurunan rugi-rugi daya listrik pada sistem kelistrikan PLTU Prafi II Manokwari. Lokasi dan besarnya injeksi pemasangan DG memberikan pengaruh terhadap penurunan rugi daya sistem tenaga listrik. Peneliti menggunakan simulasi pengujian dengan menggunakan program simulasi ETAP 6.0. Dengan menginjeksikan DG pada tingkat injeksi dan lokasi yang telah ditentukan pada bus 25, bus 53, bus 77 dan bus 103. Berdasarkan pengujian dan simulai Injeksi pada lokasi bus 77 (65% panjang saluran dari grid) dengan besar injeksi 85% kapasitas DG penurunan rugi daya sebesar dari 240,15 kW menjadi 99,39 kW atau penghematan sebesar 58,61% [2].

Kemudian penelitian mengenai analisa tanggapan frekuensi akibat masuknya *distributed generation* pada sistem interkoneksi jamali. Penelitian ini membahas bagaimana tanggapan frekuensi dari masing-masing pembangkit sebelum dan setelah pemasangan *distributed generation* bila terjadi pelepasan beban dalam rentang waktu satu detik dari detik kedua sampai dengan detik ketiga sebesar 20% pada setiap bus. Dampak pemasangan *distributed generation* pada sistem interkoneksi Jamali dengan tingkat penetrasi sebesar 20% dari jenis generator sinkron bila terjadi pelepasan beban dalam rentang waktu satu detik dari detik kedua sampai dengan detik ketiga sebesar 20% pada setiap bus menunjukkan perbaikan tanggapan frekuensi dari seluruh pembangkit berupa penurunan frekuensi maksimum antara 0,16 - 0,37 Hz dan kenaikan lamanya osilasi dan *settling time* untuk seluruh pembangkit berkisar antara 20,3 - 22,17 detik dan 12,65 - 14,51 detik [3].

Penelitian respon kecepatan rotor generator induksi DFIG dan sudut rotor generator sinkron terhadap gangguan transien di sistem pembangkit tersebar. Penelitian mengenai kestabilan transien pembangkit tersebar dengan pembangkit PT yang digunakan yaitu pembangkit angin, pembangkit diesel dan *photovoltaic*. Hasil dari penelitian tersebut dengan memberikan gangguan hubung singkat tiga fasa pada BUS 1 yang selanjutnya diselesaikan dalam waktu 100 milidetik, 200

milidetik, 300 milidetik dan 400 milidetik. Pada waktu pemutusan gangguan 350 milidetik generator sinkron hampir tidak stabil, namun kemudian dapat mengembalikan kestabilannya, sedangkan untuk generator induksi pada saat terjadi gangguan kecepatannya sempat mengalami kenaikan namun generator dapat menurunkan kecepatannya. Namun ketika gangguan diselesaikan dalam waktu 400 milidetik, generator sinkron kehilangan kestabilan dan berbeda dengan generator induksi DFIG pada pembangkit angin, walaupun pada saat terjadi gangguan kecepatannya meningkat karena terjadi penurunan torka elektrik yang cepat namun generator dapat menurunkan kecepatannya kembali [4].

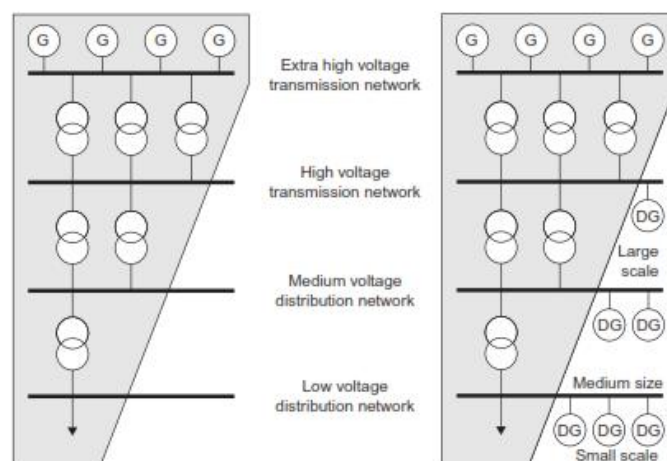
Selanjutnya penelitian mengenai studi kestabilan *photovoltaic* pada pembangkit tersebar berbasis pembangkit angin, *photovoltaic* dan pembangkit diesel terhadap gangguan di sistem tenaga. Penelitian mengenai kestabilan transien *photovoltaic* pada pembangkit tersebar, secara umum PV tidak memiliki bagian yang berputar seperti halnya generator sinkron atau generator induksi, maka PV cenderung lebih stabil setelah terjadi gangguan. Indikator kestabilan PV dapat dilihat dari frekuensi pada Bus tersebut, jika pada saat terjadi gangguan frekuensi PV berada dibawah 50,2 Hz maka PV akan tetap menyuplai daya aktif tanpa ada reduksi, namun jika frekuensi PV berada diatas 50,2 Hz maka PV harus mereduksi daya aktifnya. Pembangkit PV pada sistem pembangkit tersebar cukup stabil ketika dikenai gangguan hubung singkat tiga fasa, dengan adanya sistem pengontrolan yang baik PV dapat dengan cepat mengembalikan kestabilannya setelah terjadi gangguan dengan mereduksi daya aktif ketika frekuensi sistem diatas 50,2 Hz [5].

Berdasarkan referensi penelitian penulis ingin melakukan penelitian tentang analisa kestabilan transien penerapan *distributed generation* pada sistem tenaga listrik wilayah Bengkulu.

2.1 Distributed Generation

Distributed generation merupakan teknologi pembangkit tenaga listrik dengan skala kecil yang mensuplai tenaga listrik dekat dengan pusat beban, tentunya sangat baik karena langsung terhubung dengan sistem distribusi, fasilitas pelanggan atau keduanya. Yang termasuk kedalam DG adalah *microturbine*, panel *photovoltaic*, *fuel cells*, *internal combustion engine*. DG juga dapat digunakan untuk mensuplai beban dasar, beban puncak, dapat juga sebagai pembangkit cadangan, stabilitas jaringan, menaikkan tegangan dan yang pada akhirnya memberikan manfaat ekonomi lebih dari energi yang sederhana.

DG dapat dihubungkan pada beberapa tingkat tegangan dari 120/230V sampai 150 kV. Hanya generator sangat kecil dapat dihubungkan ke jaringan tegangan rendah, tetapi instalasi dengan tegangan ratusan mega watt terhubung ke busbar sistem distribusi tegangan tinggi (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 koneksi Distributed Generation

Menghubungkan DG ke sistem jaringan distribusi mengarah ke sejumlah tantangan dimana sirkuit didesain untuk mensuplai beban dengan aliran daya dari sirkuit tegangan tinggi ke tegangan rendah. Jaringan distribusi konvensional pasif dengan beberapa pengukuran-pengukuran dan pengontrolan aktif yang terbatas. Mereka dirancang untuk mengakomodasi semua kombinasi beban dengan tidak ada tindakan oleh operator sistem.

Hal ini seperti pasokan listrik dan permintaan harus seimbang, suntikan daya dari DG membutuhkan setara penurunan keluaran dari generator pusat. Saat ini generator pusat mensuplai energi listrik yang penting untuk operasi dan kestabilan sistem tenaga. DG diperlukan untuk menyediakan tambahan yang

diperlukan untuk menjaga fungsi sistem listrik dengan generator pusat sedikit dioperasikan [6].

2.2 Kestabilan Transien Sistem Tenaga

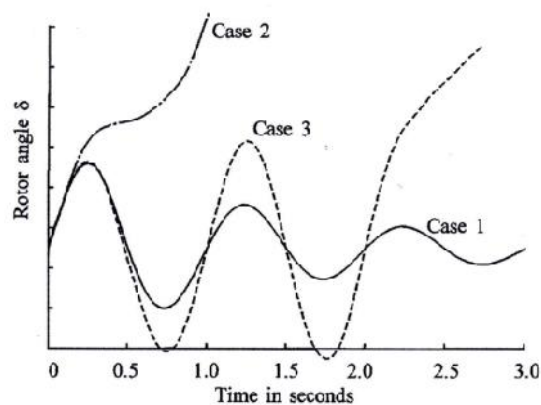
Arus yang mengalir pada sebuah generator ac atau motor serempak bergantung pada besarnya tegangan yang dibangkitkan, pada sudut fasa tegangan dalam (internal) relatif terhadap sudut fasa tegangan dalam pada semua mesin lain yang ada pada sistem, dan pada karakteristik jaringan dan beban.

Sudut fasa tegangan-dalam tergantung pada posisi relatif rotor-rotor mesin. Jika keadaan serempak dari generator-generator pada suatu sistem tidak dipelihara, sudut fasa dari tegangan-dalamnya akan selalu berubah-ubah satu terhadap yang lainnya, dan keadaan ini tidak akan memungkinkan pengoprasian yang baik. Sudut fasa tegangan-dalam pada mesin-mesin serempak dapat tetap konstan hanya jika kecepatan semua mesin tetap konstan, yaitu sama dengan kecepatan yang sesuai dengan frekuensi fasor acuan. Jika beban pada salah satu generator atau pada keseluruhan sistem berubah, arus yang mengalir pada generator atau pada keseluruhan sistem yang berubah. Jika perubahan arus tidak menyebabkan perubahan pada besarnya tegangan-dalam mesin, sudut fasa tegangan-dalam harus berubah. Jadi perubahan sesaat pada kecepatan diperlukan untuk mendapatkan pengaturan sudut fasa tegangan yang satu terhadap yang lain, karena sudut fasa ditentukan oleh posisi relatif rotor-rotornya. Jika mesin-mesin sudah menyesuaikan diri masing-masing pada sudut fasa yang baru, atau jika suatu gangguan yang mengakibatkan perubahan sesaat pada kecepatan sudah ditiadakan, mesin-mesin tersebut harus kembali beroperasi pada kecepatan serempak. Jika salah satu mesin tidak tetap serempak dengan keseluruhan sistem, terjadilah arus sirkulasi (*circulating current*) yang besar. Dalam suatu sistem yang dirancang cukup baik, beroprasinya rele dan pemutus arus akan melepaskan mesin ini dari keseluruhan sistem. Masalah kestabilan adalah masalah pemeliharaan keadaan serempak dari generator-generator dan motor-motor dalam suatu sistem, studi kestabilan terbagi dalam studi untuk kondisi keadaan-tetap dan kondisi peralihan.

Kestabilan transien adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisme ketika terjadi gangguan transien yang besar. Respon sistem yang dihasilkan menyangkut sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh hubungan sudut daya yang tidak linier. Kestabilan tergantung pada kondisi awal operasi sistem dan tingkat dari gangguan tersebut. Biasanya sistem tersebut akan diubah setelah terjadi gangguan kondisi stabil berbeda dari sebelum terjadi gangguan.

Gangguan secara luas dengan berbagai tingkat kerusakan dan kemungkinan dapat terjadi pada sistem. Sistem ini dirancang dan dioperasikan sedemikian rupa untuk menjadi stabil pada set yang kemungkinan sudah dipilih. Kemungkinan yang biasanya dipertimbangkan adalah hubung singkat fasa-fasa, fasa-fasa-tanah, atau tiga fasa. Biasanya terjadi pada sistem transmisi, tetapi dapat juga terjadi pada bus dan transformator, gangguan biasanya diatasi dengan pemutusan oleh *circuit breaker* untuk mengamankan peralatan.

Pada Gambar 2.2 mengilustrasikan kondisi mesin sinkron dalam keadaan stabil dan tidak stabil, ini memperlihatkan respon dari sudut rotor pada kondisi stabil dan tidak stabil. Pada kasus pertama sudut rotor meningkat mejadi maksimum, kemudian menurun dan berosilasi dengan penurunan amplitude hingga mencapai kondisi yang stabil. Pada kasus ke-2 sudut rotor terus meningkat sampai kehilangan sinkron. Ketidak stabilan ini merupakan ketidak stabilan ayunan pertama disebabkan tidak cukupnya torsi sinkronisasi. Pada kasus ke-3 sistem stabil pada ayunan pertama tapi menjadi tidak stabil akibat dari meningkatnya osilasi pada kondisi akhir [7].



Gambar 2.2 respon sudut rotor terhadap gangguan transien

2.2.1 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut dibagi kedalam soal-soal kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multi swing*), kestabilan ayunan-pertama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya, biasanya perioda waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem. Bila mesin sistem didapatkan tetap dalam kondisi serempak sebelum berakhirnya detik pertama, kita katakan bahwa sistem itu stabil. Masalah kestabilan ayunan-majemuk mencakup perioda telaah yang lebih lama dan karenanya harus mempertimbangkan juga pengaruh sistem pengaturan generator terhadap perilaku (*performance*) mesin didalam perioda waktu yang cukup lama [8].

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen-putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-kelambanan (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya, momen-putar mekanis T_m dan momen elektris T_e dianggap positif untuk generator serempak. Ini berarti bahwa T_m adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah perputaran ω_m yang positif.

2.2.2 Persamaan Sudut Daya

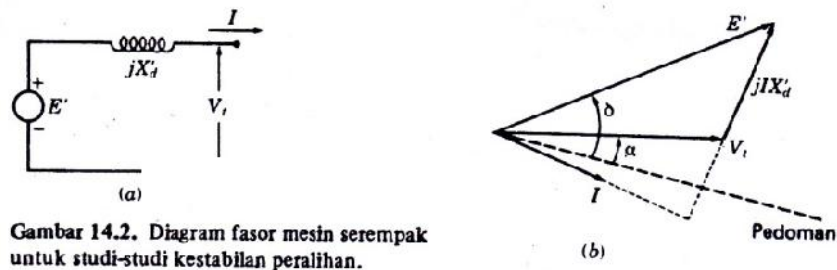
Bila P_e sama dengan P_m mesin bekerja pada kecepatan serempak keadaan-tetap, bila P_e berubah dari nilai ini rotornya menyimpang dari kecepatan serempak. Perubahan P_e ditentukan oleh keadaan pada jala-jala transmisi dan distribusi serta beban pada sistem kemana generator itu mencatu daya. Gangguan jaringan listrik dapat menyebabkan keluaran generator P_e berubah dengan cepat sehingga menimbulkan peralihan (*transients*) elektromekanis. Untuk studi kestabilan peralihan setiap mesin serempak diwakili oleh tegangan (*transient internal voltage*) E' yang terhubung seri dengan reaktansi peralihan X_d pada Gambar 2.3 dimana V_t adalah tegangan terminal. Hal ini sesuai dengan representasi keadaan tetap dimana reaktansi serempak X_d terhubung seri dengan tegangan tanpa beban E . Resistansi dapat diabaikan jangkar dapat diabaikan

sehingga diagram fasor 2.3b berlaku, karena setiap mesin harus ditinjau relatif terhadap sistem dimana mesin tersebut merupakan suatu bagian, sudut fasor kualitas mesin diukur terhadap pedoman mesin tersebut[8].

Karena P_1 mewakili keluaran daya listrik generator telah diganti dengan P_e yang dinamakan persamaan sudut daya, persamaan sudut daya yang berlaku untuk jala-jala reaktansi murni adalah

$$P_e = P_{maks} \sin \delta$$

(2.1)



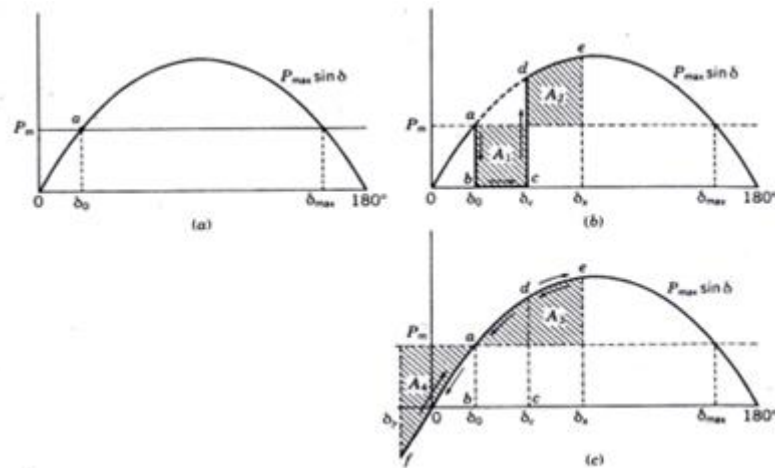
Gambar 2.3 Diagram fasor mesin serempak untuk studi kestabilan peralihan

2.2.3 Kriteria Sama Luas Pada Kestabilan

Sistem yang terlihat pada Gambar 2.4, mula-mula pemutus rangkaian A tertutup tetapi pemutusan rangkaian B pada ujung yang lain dari saluran pendek tetap terbuka. Pada titik P yang dekat dengan rel, suatu gangguan tiga fasa timbul dan dalam waktu singkat diputuskan oleh rangkaian A. Oleh karena itu sistem transmisi efektif tidak berubah kecuali selama gangguan itu bekerja. Keadaan fisik sebelum, selama dan sesudah gangguan dapat dengan menganalisis kurva sudut daya pada Gambar 2.4 [8].

Mula-mula generator bekerja pada kecepatan serempak dengan sudut rotor sebesar δ_0 dan daya mekanis masukan P_m yang sama dengan daya keluaran P_e ditunjukkan pada titik a Gambar 2.4b, ketika gangguan $t=0$ keluaran daya listrik mendadak jadi nol sementara daya mekanis masukan tidak berubah, ini hanya dapat dicapai dengan meningkatkan kecepatan yang dihasilkan dari daya percepatan P_m konstan, jika waktu yang diperlukan untuk memutuskan gangguan dinyatakan dalam t_c .

kriteria sama luas sebenarnya hanya menyatakan bahwa berapapun energi kinetis yang ditambahkan pada rotor setelah terjadinya gangguan harus dihilangkan setelah gangguan untuk mengembalikan rotor pada kecepatan serempak berakhir.



Gambar 2.4 lengkung sudut daya. Luas A_1 dan A_2 adalah sama demikian juga A_3 dan A_4

Luas A_1 yang diarsir tergantung pada waktu yang diperlukan untuk menghilangkan gangguan, jika ada keterlambatan dalam pemutusan gangguan, sudut δ_c akan bertambah demikian pula dengan luas A_1 bertambah dan kriteria sama luas menghendaki bahwa A_2 juga meningkat untuk mengembalikan rotor pada kecepatan serempak pada sudut ayunan maksimum δ_{max} yang lebih besar. Jika keterlambatan diperpanjang sehingga sudut rotor berayun melebihi sudut δ_{maks} , maka kecepatan rotor dalam lengkung sudut daya lebih besar dari kecepatan serempak ketika didapat lagi daya percepatan positif, dengan pengaruh ini maka sudut akan meningkat tanpa batas dan terjadi ketidak stabilan. Oleh karena itu kita temukan sudut kritis untuk pemutusan (*clearing*) gangguan agar persyaratan kriteria sama luas untuk kestabilan terpenuhi, sudut ini merupakan sudut pemutusan kritis δ_{cr} (*critical clearing angle*) dan pada Gambar 2.5 waktu kritis yang bersesuaian yang diperlukan untuk menghilangkan gangguan (*critical clearing time*) [8].

Sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis keduanya dapat dihitung, luas A_1 adalah

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m(\delta_{cr} - \delta_0)$$

(2.2)

Sedangkan A_2 adalah

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{maks}} (P_{maks} \sin \delta - P_m) d\delta \\ &= P_{maks}(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{maks}) - P_m(\delta_{maks} - \delta_{cr}) \end{aligned}$$

(2.3)

Dengan menyatakan rumus A_1 dan A_2 dan memindahkan suku-sukunya diperoleh

$$\cos \delta_{cr} = (P_m/P_{maks})(\delta_{maks} - \delta_0) + \cos \delta_{maks}$$

(2.4)

Dilihat dari lengkung sudut daya sinusoida bahwa

$$\delta_{maks} = \pi - \delta_0 \text{ rad listrik}$$

(2.5)

dan

$$P_m = P_{maks} \sin \delta_0$$

(2.6)

Dengan memasukkan δ_{maks} dan P_m kedalam persamaan (2.4) diperoleh

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0]$$

(2.7)

Untuk sudut pemutusan kritis. Nilai δ_{cr} yang dihitung dari persamaan ini, bila dimasukkan kedalam sisi sebelah kiri Persamaan 2.30 akan menghasilkan

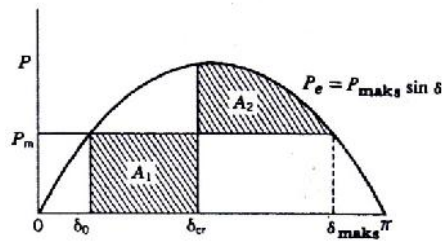
$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0$$

(2.8)

Dan dari sini diperoleh untuk waktu pemutusan kritis [7].

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}}$$

(2.9)



Gambar 2.5 Lengkung sudut daya yang menunjukkan sudut pemutusan kritis

2.3 Pembangkit Energi Listrik

Dalam prakteknya terdapat jenis-jenis pusat listrik sebagai berikut:

2.3.1 Pusat Listrik Tenaga Diesel

Pusat listrik ini menggunakan bahan bakar minyak sebagai sumber energi primer. PLTD mempunyai ukuran mulai dari 40 kW sampai puluhan MW, untuk menyalakan listrik di daerah baru umumnya digunakan PLTD oleh PLN. Di lain pihak jika perkembangan pemakaian tenaga listrik melebihi 100 MW maka penggunaan PLTD menjadi tidak ekonomis karena unitnya menjadi lebih banyak.

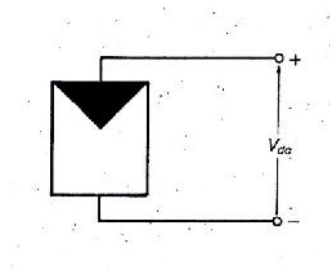
2.3.2 Pusat Listrik Tenaga Uap

Dalam PLTU, energi primer yang dikonversi menjadi energi listrik adalah bahan bakar berupa batu bara, minyak atau gas dan ada kalanya menggunakan kombinasi beberapa macam bahan bakar. Konversi energi tingkat pertama yang berlangsung dalam PLTU adalah konversi energi primer menjadi energi panas (kalor). Hal ini dilakukan dalam ruang bakar ketel uap PLTU, energi panas ini kemudian dipindahkan kedalam air yang ada dalam pipa ketel untuk menghasilkan uap yang dikumpulkan dalam drum dari ketel, uap dari drum ketel dialirkan ke turbin uap kemudian dikonversi menjadi energi listrik oleh generator.

2.3.3 Pusat listrik Sel Surya

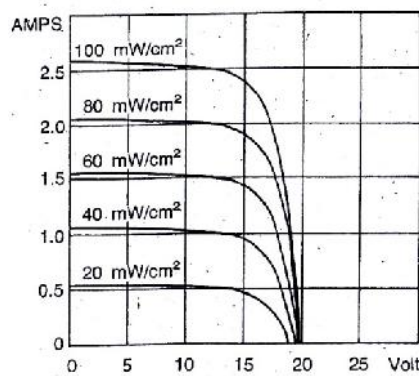
Solar cell atau sel surya atau sel *photovoltaic* merupakan alat yang dapat mengubah energi sinar matahari menjadi energi listrik. pada prinsipnya sel *photovoltaic* beroperasi melalui 3 tahapan yaitu penyerapan cahaya yang menyebabkan eksitasi electron dari material *photovoltaic*, sehingga menghasilkan

pasangan *electron-hole* atau disebut juga dengan *exciton*. Proses selanjutnya yaitu pemisahan pembawa muatan (*charge carrier*) yang muatannya berbeda. Selanjutnya muatan-muatan tersebut masuk kedalam sirkuit eksternal. Jadi pada *photovoltaic* ini, bahan semikonduktor yang diproses sedemikian rupa sehingga apabila bahan tersebut terkena sinar matahari atau cahaya, maka akan mengeluarkan tegangan listrik arus searah (dc). *Photovoltaic* juga sejenis dengan diode yang tersusun atas PN junction. Symbol yang diberikan untuk *photovoltaic* seperti pada Gambar 2.6 [9].

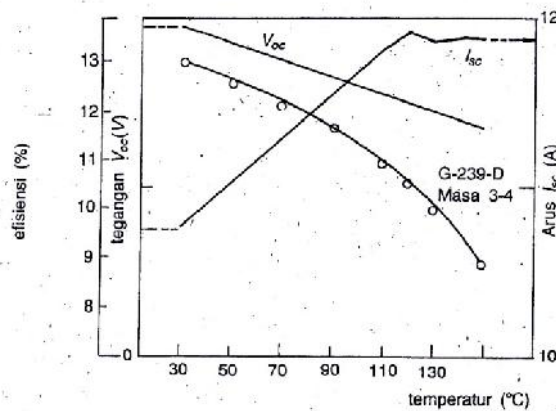


Gambar 2.6 simbol photovoltaic

Karakteristik tegangan versus arus untuk radiasi yang berbeda-beda pada suatu *photovoltaic* dapat dilihat pada Gambar 2.7 pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa tegangan open circuit yang terjadi (V_{oc}) kira-kira konstan, tetapi arus hubung singkat (I_{sc}) akan berubah-ubah sesuai dengan besarnya radiasi yang mengenainya. Dengan kemajuan teknologi yang telah dicapai dalam pembuatan *photovoltaic* ternyata efisiensi hanya mampu mencapai sekitar 10%-13%. Jadi misalnya daya (P) dari radiasi matahari adalah 1000 watt/m^2 , maka daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic* adalah 100 watt/m^2 dan efisiensi bergantung juga pada temperature selnya. Efisiensi akan menurun pada temperature yang lebih tinggi, temperatur standar dalam pengukuran efisiensi adalah 25^0 celcius dan grafik efisiensi untuk *solar cell* pada Gambar 2.8 [10].



Gambar 2.7 karakteristik *photovoltaic*



Gambar 2.8 karakteristik efisiensi terhadap temperatur

2.3.4 Pembangkit Listrik Tenaga Air

Air merupakan sumber energi yang murah dan relatif mudah didapat karena pada air tersimpan energi potensial (pada air jatuh) dan energi kinetik (pada air mengalir). Tenaga air (*Hydropower*) adalah energi yang diperoleh dari air yang mengalir, energi yang dimiliki air dapat dimanfaatkan dan digunakan dalam wujud energi mekanis maupun energi listrik. Pemanfaatan energi air banyak dilakukan dengan menggunakan kincir air atau turbin air yang memanfaatkan adanya suatu air terjun atau aliran sungai. Besarnya tenaga air yang tersedia dari suatu sumber air bergantung pada besarnya *head* dan debit air. Dalam hubungan dengan reservoir air maka *head* adalah beda ketinggian antara muka air pada *reservoir* dengan muka air keluar dari kincir/ turbin air [11].

Pembangkit listrik tenaga air merupakan teknologi yang relatif matang dan banyak dikembangkan. Unit operasi pembangkit kecil dan menengah yang

terhubung ke sistem distribusi secara parallel, pembangkit tenaga air tanpa kapasitas penyimpanan air yang signifikan mungkin akan mengalami variasi yang besar dalam ketersediaan air karena curah hujan yang bervariasi dan jika area tangkapan air pada tanah berbatu atau dangkal serta aliran sungai pendek. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) adalah pembangkit listrik berskala kecil (kurang dari 200 kW), yang memanfaatkan tenaga (aliran) air sebagai sumber penghasil energi. PLTMH termasuk sumber energi terbarukan dan layak disebut *clean energy* karena ramah lingkungan. Dari segi teknologi, PLTMH dipilih karena konstruksinya sederhana, mudah dioperasikan, serta mudah dalam perawatan dan penyediaan suku cadang. Secara ekonomi, biaya operasi dan perawatannya relatif murah, sedangkan biaya investasinya cukup bersaing dengan pembangkit listrik lainnya. Secara sosial, PLTMH mudah diterima masyarakat luas (bandingkan misalnya dengan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir). PLTMH biasanya dibuat dalam skala desa di daerah-daerah terpencil yang belum mendapatkan listrik dari PLN. Tenaga air yang digunakan dapat berupa aliran air pada sistem irigasi, sungai yang dibendung atau air terjun. Secara teknis, *mikrohydro* memiliki tiga komponen utama yaitu air (sebagai sumber energi), turbin dan generator. Mikrohidro mendapatkan energi dari aliran air yang memiliki perbedaan ketinggian tertentu. Pada dasarnya, *microhydro* memanfaatkan energi potensial jatuhan air (*head*). Semakin tinggi jatuhan air maka semakin besar energi potensial air yang dapat diubah menjadi energi listrik. Di samping faktor geografis (tata letak sungai), tinggi jatuhan air dapat pula diperoleh dengan membendung aliran air sehingga permukaan air menjadi tinggi. Air dialirkan melalui sebuah pipa pesat kedalam rumah pembangkit yang pada umumnya dibangun di bagian tepi sungai untuk menggerakkan turbin atau kincir air mikrohidro. Energi mekanik yang berasal dari putaran poros turbin akan diubah menjadi energi listrik oleh sebuah generator [12].



Gambar 2.9 skema PLTMH

Keuntungan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro adalah jika dibandingkan dengan pembangkit listrik jenis yang lain, PLTMH ini cukup murah karena menggunakan energi alam. Memiliki konstruksi yang sederhana dan dapat dioperasikan di daerah terpencil dengan tenaga terampil penduduk daerah setempat dengan sedikit latihan. Tidak menimbulkan pencemaran. Dapat dipadukan dengan program lainnya seperti irigasi dan perikanan. Dapat mendorong masyarakat agar dapat menjaga kelestarian hutan sehingga ketersediaan air terjamin [12].

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu Penelitian

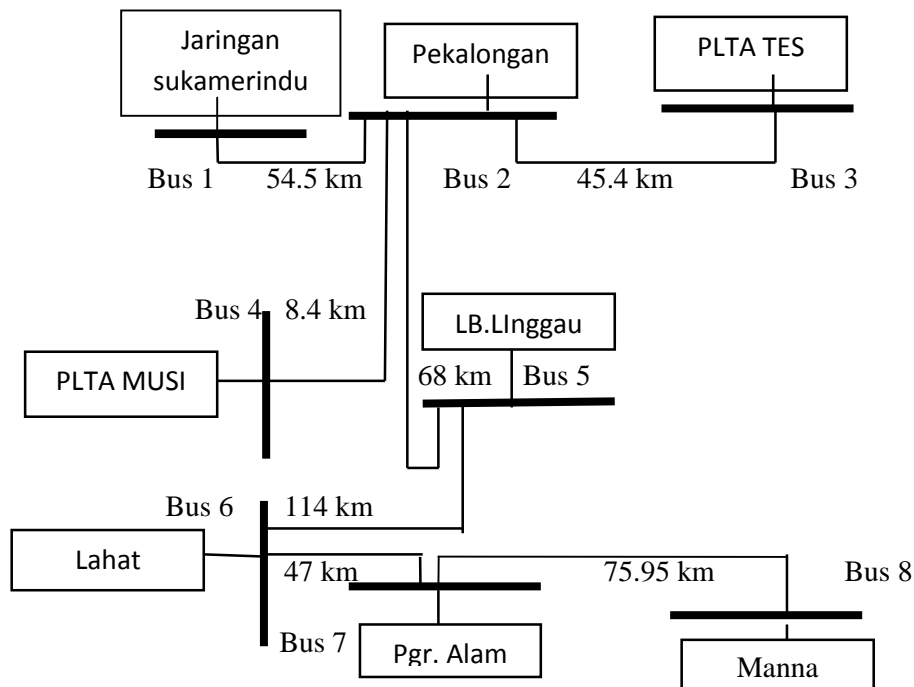
Penelitian ini dilaksanakan selama (± 6 bulan). Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium fakultas teknik dan di wilayah kerja unit penyaluran transmisi Bengkulu.

3.2 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah kestabilan generator utama sistem tenaga yang berada dalam wilayah kerja unit penyaluran transmisi Bengkulu ketika diberi tambahan DG dengan sumber tenaga bersal dari *photovoltaic* 1.2 MW dan pembangkit Mikrohydro 2 x 700 kW.

3.3 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah simulasi menggunakan program Digsilent power factor dengan rangkaian simulasi seperti pada Gambar 3.1 jaringan sistem tenaga listrik wilayah kerja UPT Bengkulu.

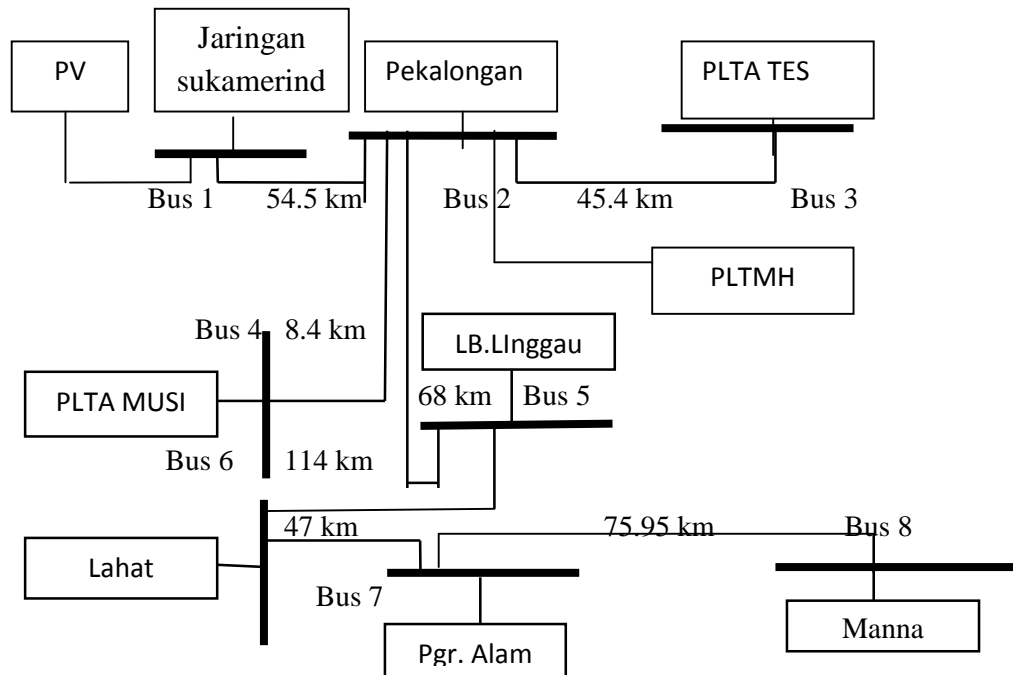


Gambar 3.1 jaringan sistem tenaga listrik untuk simulasi

Data yang diperlukan dalam simulasi Digsilent power factor berupa:

- Single line diagram
 - Single line diagram UPT Bengkulu
- Data Jaringan
 - Panjang Saluran
 - Resistansi saluran
 - Reaktansi saluran
 - Rating Tegangan
 - Arus
 - Frekuensi
 - Material Penghantar
- Data Generator Utama
 - Daya aktif
 - Daya reaktif
 - Faktor Daya
- Data Trafo
 - Kapasitas Daya
 - Sisi Tegangan rendah
 - Sisi Tegangan Tinggi
- Data Beban
 - Beban setiap bus saluran
 - Beban penjulang
- Data pembangkit DG
 - Daya Aktif
 - Daya reaktif

Pada Gambar 3.2 merupakan jaringan sistem tenaga listrik yang digunakan pada simulasi Digsilent Power Factor terdiri atas sepuluh bus dengan dua pembangkit utama dan 4 pembangkit tersebar (DG), dimana pembangkit utama berada pada bus 3 yang merupakan pembangkit PLTA TES dengan kapasitas 4 x 4.9 MW dan 2 x 630 kW sedangkan pada bus ke 4 adalah PLTA Musi dengan kapasitas 210 MW.

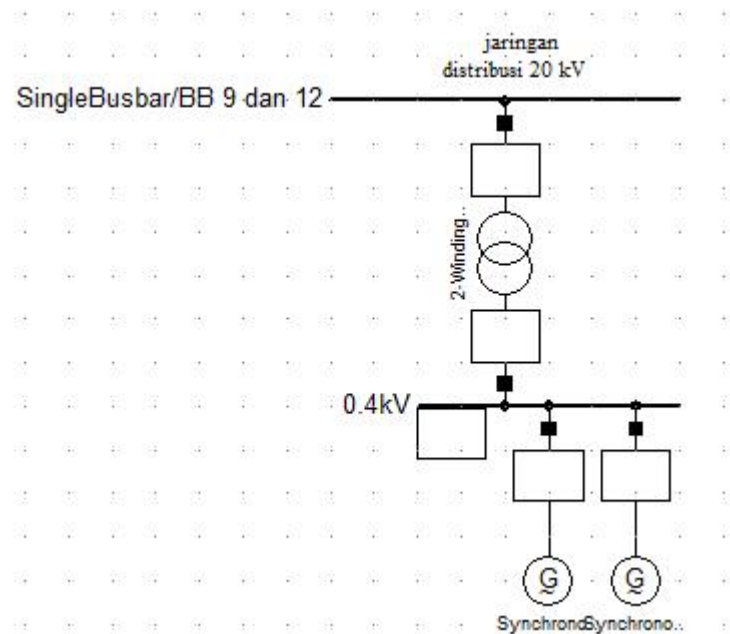


Gambar 3.2 jaringan sistem tenaga listrik dengan penambahan DG untuk simulasi

Dari Gambar 3.2 bus 1 dan 2 merupakan bus yang akan diberikan tambahan DG dengan menggunakan pembangkit *microhydro* 2 x 700 kW yang terhubung dengan sistem jaringan distribusi 20 kV bus pekalongan dengan sistem pembangkitan terdistribusi pada Gambar 3.3.

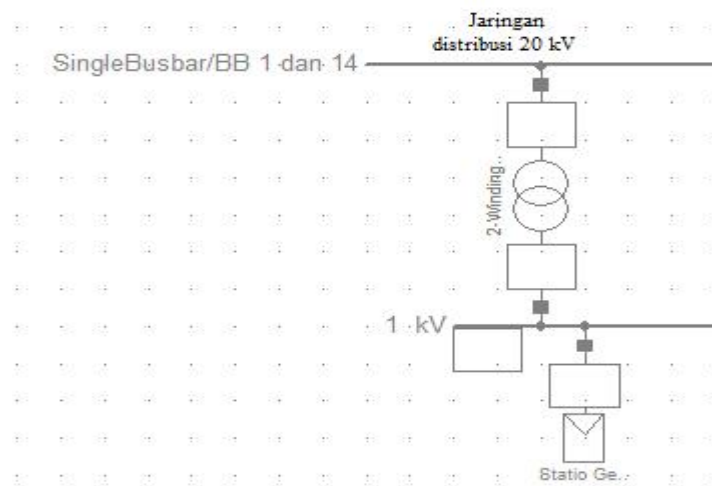
Kemudian pada bus 1 akan menggunakan tambahan DG dengan pembangkit *photovoltaic* 1.2 MW yang terhubung dengan jaringan distribusi 20 kV dengan sistem pembangkit terdistribusi *photovoltaic* Gambar 3.4. Pada bus 1 sukamerindu seperti pada gambar 3.2. untuk memperoleh PV dengan kapasitas 1.2 MW tersebut maka digunakan PV dengan nilai V_{mpp} dan I_{mpp} (tegangan dan arus daya maksimum) pada kondisi tes standar dari datasheet sebesar 63.3 Volt dan 7.9 A, kemudian dengan 30 modul photovoltaic tersusun seri dan 80 modul disusun secara parallel. Maka daya yang akan dihasilkan adalah sebesar:

$$(63.3 \times 30 \text{ modul seri}) \cdot (7.9 \times 80 \text{ modul parallel}) = 1.2 \text{ MW}$$

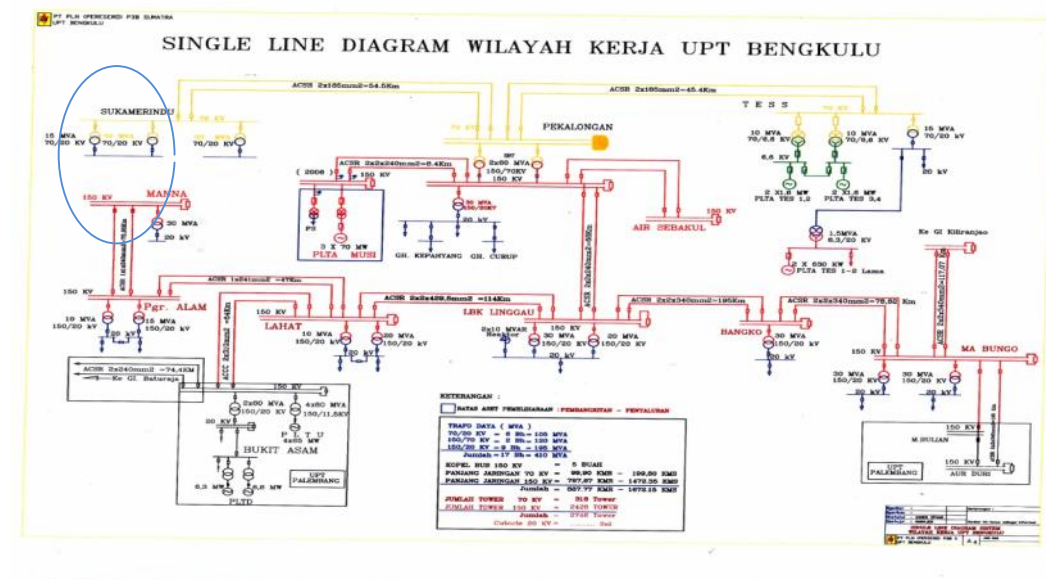


Gambar 3.3 Sistem dengan pembangkit terdistribusi microhydro pada bus 2 pada simulasi

Dari Gambar 3.2, untuk mengetahui pengaruh penggunaan DG terhadap kestabilan transien sistem tenaga maka akan diberikan gangguan transien pada bus 1 sukamerindu, pada Gambar 3.5. Untuk selanjutnya dilakukan analisis terhadap kestabilan pembangkit utama terhadap penggunaan DG sebelum dan setelah diberi gangguan transien pada bus jaringan sukamerindu.



Gambar 3.4 Sistem dengan pembangkit terdistribusi *photovoltaic* pada bus 1



Gambar 3.5 Rencana pemberian gangguan 3 fasa bus saluran

3.3.1 DIGSilent power factor.

Pada program simulasi Digsilent power factor menggunakan Metode newton-raphson untuk analisis aliran daya yang secara umum adalah sebuah algoritma interaktif untuk menyelesaikan sebuah persamaan non linear dengan angka yang sama tidak diketahui. Persamaan untuk persamaan non linear adalah:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = y_1, i = 1, 2, \dots, n \quad (3.1)$$

Dengan perkiraan x_1

$$x_1^{(0)}, x_2^{(0)} \dots \dots \dots x_n^{(0)}$$

Dimana tidak jauh berbeda dengan solusi yang aktual. Kemudian menggunakan seri taylor dan mengabaikan urutan yang lebih tinggi, kemudian diperbaiki dalam persamaan berikut;

$$(x_1^{(0)} + \Delta x_1, \Delta x_2^{(0)} + \Delta x_{2,\dots}, x_n^{(0)} + \Delta x_n) = y_1$$

Dimana x_1 diperbaiki dalam $x_1 = (i=1, 2, \dots, n)$

Suatu persamaan linier yang mendefinisikan sebuah tangent untuk fungsi $f_1(x)$ diberikan iterasi $(x_1^{(0)})$ sebagai berikut

$$Y = J \cdot X$$

Dimana Y adalah kolom vektor determinan

$$y_1 = f_1(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$$

Dimana X adalah kolom vektor dari koreksi X_1 dan J adalah matrix jakobian. untuk fungsi f yang diberikan urutan pertama

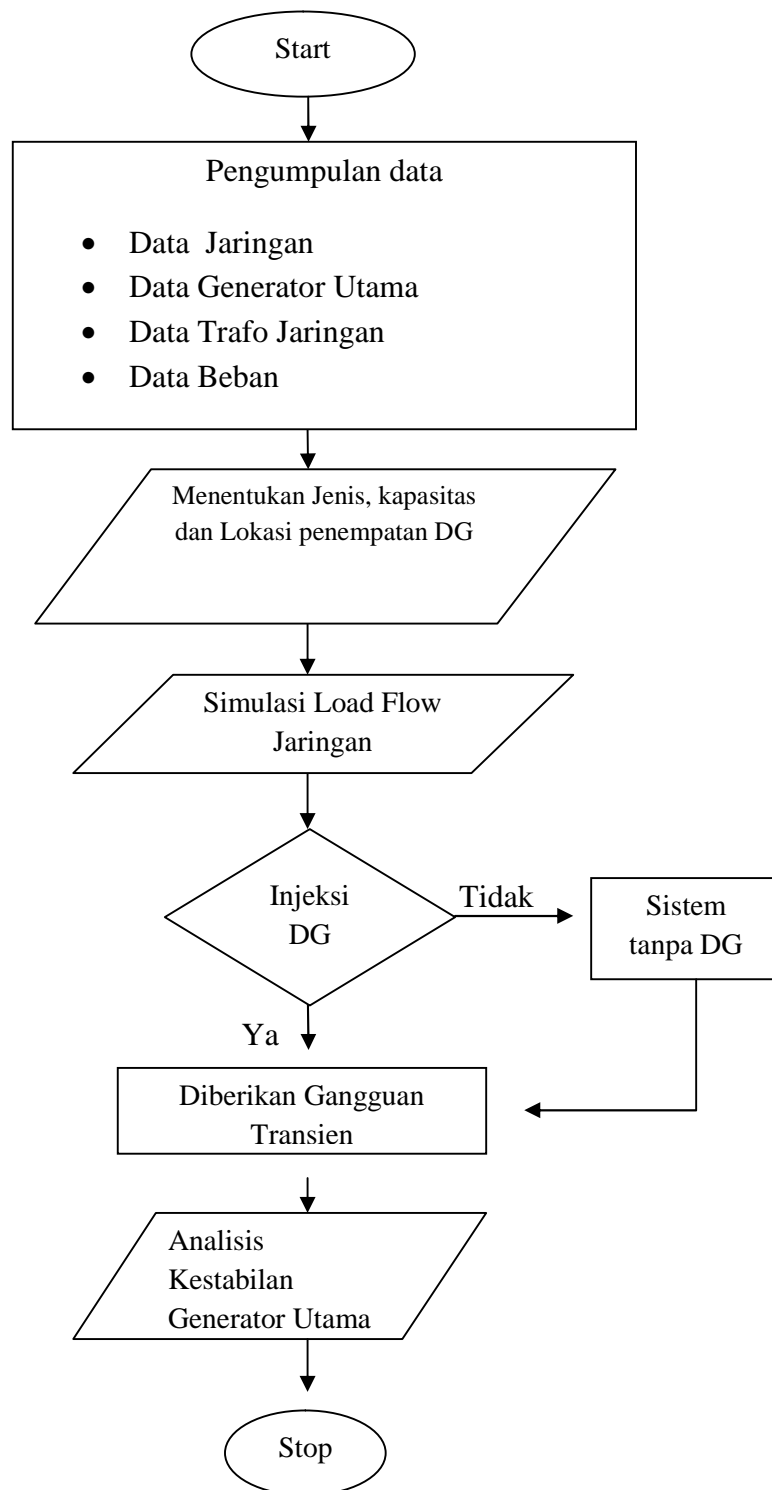
$$x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1$$

Matrix jakobian didefinisikan oleh

$$J_{1k} = \frac{\partial f_1}{\partial x_k}$$

Sebuah solusi untuk persamaan non linear yang digunakan untuk menyelesaikan masalah aliran daya.

3.4 Diagram Alir



Gambar 3.6 Diagram alir sistem kendali

Diagram alir sistem kendali pada Gambar 3.5. dapat dijelaskan bahwa proses pertama yaitu mulai mempersiapkan data yang akan digunakan dalam penelitian,

proses selanjutnya yaitu menentukan lokasi dan jenis DG yang sesuai dengan potensi daerah penempatan DG. Proses selanjutnya menentukan kapasitas DG yang sesuai dengan sumber daya alam yang ada. kemudian memproses data yang telah diperoleh kedalam simulasi Dighsilent powerfactor selanjutnya diberi injeksi DG pada daerah yang telah ditentukan, setelah itu diberikan gangguan transien untuk kemudian dianalisa dan melihat kestabilan sistem terhadap penggunaan DG.